5章 分散ターゲット

防災科研　瀧下恒星

4章の復習

- 一つの目標を捉える際のレーダー方程式
- 面積A_σの目標が遮るパワーp_σは

$$p_\sigma = p_t g A_\sigma / 4\pi r^2$$

- レーダーが検出するエネルギーp_rは

$$p_r = p_t g^2 \lambda^2 A_\sigma / 64\pi^3 r^4$$

- 目標の面積A_σを後方散乱断面積σに置き換え
- 球体がレーダーの波長よりも大きい場合：$\sigma = \pi D^2$
- 球体がレーダーの波長よりも小さい場合

$$\sigma = \frac{\pi^5 |K|^2 D^6}{\lambda^4}$$

今週の概要

- 大量の粒子からなる雨や雲を検知しよう！
- 後方散乱断面積の和をレーダー反射率 η と定義
- 複素屈折率パラメータ$|K|$を導入
- 粒子のD^6の和で定義されるレーダー反射因子zを導入
- zを対数化したZを導入

パルスの検査体積内に含まれる粒子数

- 雲粒の数密度は≧200個/cm^3=2×10^{8}個/m^3
- ビーム幅1° のパルスは57km先で直径1kmになる
- 1μsのパルス長は有効サンプル長さ150mに相当
  - 光速3×10^{5}km/s×10^{-6}s×1/2=0.15（…？）
- このパルスに含まれる粒子は2×10^{16}個にのぼる
  - 2×10^8 /m^3×500$^2\pi$ m^2×150 m = 2.35×10^{16}
- 雨粒の個数密度は数～数百個/m^3
  →パルスに含まれる粒子は10^9-10^{12}個
- 後方散乱断面積は個々の後方散乱断面積の合計

$$\sigma_t = \sum_{i=1}^{n} \sigma_i \quad (5.1)$$

適切なサンプリング間隔

- 効果的に雲や雨の情報を得るためには，次のパルスを送ったときに異なる粒子配置になるように時間間隔を空けるべき
- 測定値が互いに独立するように粒子が再配列するまでの時間を「非相関時間」と呼ぶ
  - t_iでのビーム波形とt_{i+1}でのビーム波形の相関係数が0.01になる時間$t_{0.01}$
- 非相関時間はレーダー波長，粒子そのもの，サンプル体積内の乱流に依存
  - 短波長で短く，粒径のばらつきが小さいと長く，乱流が強いと短くなる

具体的な非相関時間と実際の時間間隔

- 経験的には，$2\lambda \leq t_{0.01} \leq 3\lambda$
  - – Xバンドの場合， λ =30mm
    →2×3×10^{-2} m/s /3×10^{5} km/s=2×10^{-7} s（…？）
- 独立したジャンプリングには3～30Hzのサンプリングが必要
- 実際はこれより遥かに高い1000Hz近くでサンプリングする
- その他の非相関時間を短くする要因：レンジ平均を行う，アンテナを方位角方向に移動，ウィンドシア，乱流

サンプル体積

- $V = \pi \frac{r\theta}{2} \frac{r\phi}{2} \frac{h}{2}$ (5.2)
  θ：水平ビーム幅，ϕ：垂直ビーム幅（rad）
  r: レーダーからサンプル体積までの距離
  h：パルス長 (h=c τ)；後縁と同時に戻るようh/2
- 全後方散乱断面積σ_tは

$$\sigma_t = V \sum_{vol} \sigma_i \quad (5.3)$$

- 実際のレーダーのビームの偏りを考慮して Probert-Jones (1962)は以下の式を得た：

$$V = (\pi r^2 \theta \phi h)/(16 \ln 2) \; (5.4)$$

((5.2)式の1/2ln2倍)

σ_iのレーダー方程式

- (5.3), (5.4)式を (4.7)式： $p_r = p_t g^2 \lambda^2 \sigma_t / 64\pi^3 r^4$ に代入

$$p_r = \frac{p_t g^2 \lambda^2}{64\pi^3 r^4} \frac{\pi r^2 \theta \phi h}{16 \ln 2} \sum_{vol} \sigma_i$$

$$= \frac{p_t g^2 \lambda^2 \theta \phi h \Sigma \sigma_i}{1024 \ln 2\, \pi^2 r^2} \quad (5.5)$$

- レーダー気象観測黎明期に$\sum_{unit\ volume} \sigma_i$をレーダー反射率$\eta$と定義
- (4.9)式の通り，

$$\sigma_i = \frac{\pi^5 |K|^2 D_i^6}{\lambda^4} \quad (5.7)$$

複素屈折率パラメータ|K|

- $K = \frac{m^2-1}{m^2+1}$ (5.8), $m = n + ik$ (5.9)
  - n: 球の屈折率；$i = \sqrt{-1}$；kは球の吸収係数
  - 材料，温度，レーダー波長に依存
  - 材料依存性が大きい
  - 水では$|K|^2$=0.93，氷では$|K|^2$=0.197
    →5倍=7dB異なる（※$\log_{10}5$=0.699→6.99dB）
  - 暴風雨では水の値を用いるのが一般的

D^6とzのレーダー方程式

- (5.5), (5.7)式から

$$p_r = \frac{\pi^3 p_t g^2 \theta \phi h |K|^2 \Sigma D_i^6}{1024 \ln 2\, \lambda^2 r^2} \quad (5.10)$$

- すべての雨滴の直径がわかることはほぼないのでレーダー反射因子zを導入

$$z = \sum_{vol} D^6 \quad (5.11)$$

  – 総和は全サンプル体積でなく単位体積に対して行う

- (5.10)に(5.11)式を代入して

$$p_r = \frac{\pi^3 p_t g^2 \theta \phi h |K|^2 z}{1024 \ln 2\, \lambda^2 r^2} \quad (5.12)$$

レーダー反射率ηと反射因子z

- 粒子がレイリー散乱を満たしていれば(5.12)式はどのレーダーにも適用可能
- η とzは$\eta = \pi^5 |K|^2 z / \lambda^4$となる
- η はレーダーの波長に依存するが
zは雨滴数と大きさの関数なので
zが嵐の特性を表す
- 初期に定義されたηは使わずzを使用しましょう
- レーダー方程式に減衰lをかけるのも必要(5.14式)

レーダー方程式の簡略化

- レーダーに固有のパラメータをと数値定数をそれぞれすべてまとめて簡略化

$$p_r = \frac{c_1|K|^2 z}{r^2} \ (5.15)$$

- 水粒子に限定すれば$c_2 = c_1|K|^2$ともできる
- zを求める式にすると

$$z = c_3 p_r r^2 \ (5.17)$$

レーダー反射因子の対数化

- zは最大で36,000,000 mm^6/m^3に至るので対数Zを使うのが一般的

$$Z = 10\log_{10}\frac{z}{1\,mm^6/m^3} \quad (5.18)$$

- Zの単位はdBZ (1 mm/m^3の反射率に対するデシベル)
  – 霧は-30dBZ, 大ひょうは+76.5dBZ
- (5.17)式も対数化

$$Z = C_3 + P_r + 20\log_{10} r \quad (5.19)$$

粒径分布からZを求める

- 地上で落下した粒子の粒径分布を求めることでZを計算することができる

$$z = \Sigma N_i D_i^6 \ (5.20)$$